干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

东祁连山高寒草甸土壤理化性质对海拔和坡向的响应及其与植被特征的关系

李 强[1]， 何国兴[1]， 文 铜[1]， 杨冬阳[1]， 张德罡[1]， 韩天虎[2]，
潘冬荣[2]， 柳小妮[1]

（1. 甘肃农业大学草业学院/草业生态系统教育部重点实验室，甘肃 兰州 730070；
2. 甘肃省草原技术推广总站，甘肃 兰州 730000）

摘 要：为了探索高寒草甸土壤理化性质对海拔和坡向的响应及其与植被的关系，以东祁连山高寒草甸为研究对象，分析了7个海拔和2个坡向高寒草甸的土壤养分含量和生态化学计量比变化规律及其与植被的关系。结果表明：(1) 土壤含水量、电导率、有机碳、全氮、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾含量、碳磷比（C/P）和氮磷比（N/P）随海拔的升高呈先升高后降低的趋势，土壤容重、全磷和碳氮比（C/N）呈先降低后升高的趋势。(2) 同一海拔，大部分海拔梯度阳坡的土壤土壤容重、速效钾、电导率和全磷高于阴坡，阳坡的土壤含水量、速效磷、C/P和N/P低于阴坡，海拔3200 m梯度以下阳坡的土壤有机碳、全氮、碱解氮和C/N低于阴坡。(3) 不同海拔和坡向的高寒草甸土壤C/N、C/P和N/P处于14.55~38.13、12.61~87.94和0.27~5.01之间。(4) 冗余分析（RDA）发现，土壤容重、全氮和速效磷是影响高寒草甸植被的关键土壤因子，聚类分析发现海拔3200~3400 m的阴坡和阳坡聚为一类。综上所述，东祁连山高寒草甸土壤养分和生态化学计量比随海拔和坡向的变化呈规律性变化，基于对N/P比的分析发现，该区域高寒草甸类草原的初级生产力主要受土壤氮限制且低海拔和高海拔区域尤为明显，基于聚类分析发现，海拔3000 m和3400 m是该区域草地植被和土壤特征发生变化的临界线。建议在高寒草甸类草原的管理过程中，应该充分考虑海拔和坡向的分异性特征。

关 键 词：高寒草甸；海拔；坡向；生态化学计量比；冗余分析（RDA）

文章编号：

作为草地生态系统的重要组成部分，土壤是植物生长发育的基质，直接影响植被群落的结构和生产力[1]。土壤养分是草地植物养分的主要来源，其含量差异和平衡关系及土壤物理结构是调控植物生长和分布的关键因子[2]。土壤生态化学计量比表征了生物个体、种群的养分限制乃至生态系统的结构和功能[3-4]，如碳氮比（C/N）和碳磷比（C/P）反映土壤氮、磷供应能力和分解速率，而氮磷比（N/P）反映了土壤氮、磷元素供应的限制[5-6]。贺金生等[3]系统的论述了生态化学计量比从个体到生态系统的统一理论及其养分限制理论，而陈云等[5]和孙小妹等[6]对我国典型生态脆弱区和天然草原生态化学计量方面的研究成果进行了梳理。研究发现，地形因素通过影响土壤与环境之间物质与能量的交换，且与其他成土因素共同影响土壤养分的分布与积累，进而影响着土壤生态化学计量特征的变化[1]。海拔和坡向是山地生态系统主要的地形因子，通过影响山地生态系统的水热环境进而影响区域内土壤养分分布格局和化学计量特征比[7]。因此，探索草地土壤理化性质和生态化学计量特征，揭示植物与土壤养分之间的关系，进而更好地认识养分元素的循环和平衡机制[8]，了解地形因子变化过程中土壤养分含

收稿日期：2021-11-03； **修订日期**：2021-12-06
基金项目：甘肃省新一轮草原补奖效益评估及草原生态评价研究（XZ20191225）；超低空微遥感技术在草原监测中的应用研究及推广示范（201647）资助
作者简介：李强（1990-），男，在读博士，主要从事草地资源与生态研究. E-mail: 1245524440@qq.com
通讯作者：柳小妮（1969-），女，博士，教授，主要从事草地资源与生态、3S技术方面的研究. E-mail: liuxn@gsau.edu.cn

量和生态化学计量特征的变化规律，对评估土壤质量和合理管理草地具有重要的生态学意义。

祁连山是我国西北重要的生态安全屏障[9-11]，而高寒草甸是祁连山的主要草地类型之一，对祁连山地区的生态系统稳定性起着举足轻重的作用[12]。目前，针对祁连山不同海拔、植被类型的土壤养分和生态化学计量特征开展了大量研究发现[13-16]，如马剑等[13]和高海宁等[14]研究发现，祁连山北麓土壤C/N、C/P随海拔升高总体呈下降趋势，且均在中高海拔处最高，植被类型、海拔、坡向和盖度是影响土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)含量和化学计量比的主要因素，但是针对高寒草甸系统的对海拔和坡向变化过程中的土壤理化性质和生态化学计量比的变化特征的研究尚未见报道，海拔和坡向地形因子的互作对土壤理化性质和生态化学计量比的影响有助于揭示区域高寒草甸的养分匮缺和养分限制，对合理的管理高寒草地具有重要的意义。

因此，本研究以东祁连山高寒草甸为研究对象，通过分析不同海拔和坡向下土壤理化性质含量和生态化学计量比变化规律及其与植被的关系，以期为实现高寒草甸的合理管理和生态保护提供科学的数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区(102°26′31″~102°55′01″E，37°07′23″~37°17′53″N)位于甘肃省天祝藏族自治县抓喜秀龙乡的东祁连山金强河上游，海拔2600~4300 m。该区域属于高寒湿润气候，全年≥0 ℃的积温平均为1360 ℃，年平均气温-0.1~0.6 ℃，年均蒸发量1483~1614 mm，年平均降水量446 mm，气候寒冷潮湿，平均相对湿度55%[16]。研究区主要的草地类型是高寒草甸，土壤类型以亚高山草甸土、山地黑钙土、山地草甸土为主，且pH为6.94~8.17。

1.2 样地设置与样品采集

2020年7月30日—8月2日，在东祁连山金强河流域选取了7个不同海拔(2800 m、3000 m、3200 m、3400 m、3600 m、3800 m和4000 m)，同一海拔设置2个不同坡向(阳坡、阴坡)样地，采样区域均为禁牧区，每个样地随机各选取3个10 m×10 m的采样区域(表1)。

每个采样区域按对角线设3个50 cm×50 cm的样方，即3个重复。采卷尺和针刺法用测定每个样方中植被的草层高度和总盖度及不同种植物的高度和分盖度，然后分物种采集地上生物量(齐地面刈割，放入样品袋中)，称鲜重后，带回实验室于105 ℃烘箱中杀青2 h后，60 ℃下恒重，称重。草样刈割后，采用直径5 cm土钻采集表层0~30 cm土样用于测定土壤养分含量，同时，用环刀取土壤样品测定土壤容重和含水量。

1.3 土壤理化性质测定

土壤容重和含水量分别采用环刀法和烘干法

表1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of sample points

海拔/m	坡向	经纬度	优势植物	植被盖度/%
2800	阳坡	102°54′39″E，37°08′48″N	线叶嵩草、冷蒿	40~45
	阴坡	102°55′01″E，37°07′23″N	线叶嵩草、萎陵菜	60~65
3000	阳坡	102°46′59″E，37°12′36″N	线叶嵩草、甘肃棘豆、冷蒿	65~70
	阴坡	102°48′20″E，37°10′14″N	珠芽蓼、线叶嵩草、甘肃棘豆	80~85
3200	阳坡	102°44′39″E，37°13′39″N	线叶嵩草、黄花蒿	75~80
	阴坡	102°43′59″E，37°11′26″N	珠芽蓼、线叶嵩草、甘肃棘豆	90~95
3400	阳坡	102°31′42″E，37°15′54″N	线叶嵩草、珠芽蓼、甘肃棘豆	70~75
	阴坡	102°37′35″E，37°13′09″N	线叶嵩草、草地早熟禾、珠芽蓼	75~80
3600	阳坡	102°27′44″E，37°16′47″N	珠芽蓼、萎陵菜、香青	65~70
	阴坡	102°34′38″E，37°13′03″N	矮生嵩草、萎陵菜、珠芽蓼	75~80
3800	阳坡	102°25′52″E，37°17′38″N	矮生嵩草、珠芽蓼	55~60
	阴坡	102°32′45″E，37°12′57″N	矮生嵩草、萎陵菜、珠芽蓼	60~65
4000	阳坡	102°26′30″E，37°17′54″N	红景天、矮生嵩草	20~25
	阴坡	102°32′18″E，37°06′07″N	红景天、矮生嵩草	15~20

测定；土壤持水性参照由中国科学院南京土壤研究所物理研究室出版的《土壤物理性质测定方法》[17]。

土壤pH和电导率测定：取部分风干土，过100目筛子，称取10 g，加入50 mL去离子水，在全自动摇床上150 rpm振荡1 h，静至10 min，采用酸度计和电导率仪测定土壤pH和电导率。

全效养分测定：取部分风干土壤样品，过80目筛，然后进行研磨，使粒径小于0.15 mm，待测。土壤有机碳（SOC）测定采用全自动碳分析仪（Multi N/C 2100S/1，Analytik Jena AG, Germany），土壤全氮测定采用凯氏定氮法、全磷测定采用钼锑抗比色法、全钾测定采用氢氧化钠熔融-火焰光度计法[17]。

速效养分的测定：将部分阴干土过100目筛子，将土壤样品进行研磨，使粒径小于0.25 mm，取土壤样品测定土壤速效氮（AN）、速效磷（AP）和速效钾（AK）。土壤速效氮采用扩散吸收法测定[17]，土壤速效磷采用钼锑抗比色法测定（由于研究区土壤有机质含量较高，加入活性炭脱色测定效果不佳，故采用高锰酸钾氧化-葡萄糖还原法的方法进行脱色处理，详细脱色处理步骤参照张德罡等[18]的草原速效磷测定方法），土壤速效钾采用醋酸铵-火焰光度计法测定[17]。

1.4 数据处理与分析

使用Excel 2010软件进行数据整理和绘图。使用SPSS 21.0软件进行方差分析和T检验。使用SPSS 21.0和Canoco 5.0进行聚类和冗余分析（RDA）研究高寒草甸不同海拔和坡向土壤理化性质和生态化学计量比的异质性及其与植被的关系。

2 结果与分析

2.1 不同海拔和坡向下高寒草甸植被特征

由表2可知，随着海拔升高，植被盖度先升高后降低，阳坡和阴坡均在海拔3200 m处达最大值（80.00%和96.67%）；同一海拔，除了海拔4000 m之外，阴坡植被盖度均高于阳坡，且海拔2800 m、3000 m、3200 m和3400 m的阴坡植被总盖度显著高于阳坡。高寒草甸草层高度和地上生物量变化规律与植被盖度基本类似。

2.2 不同海拔和坡向下高寒草甸土壤容重、含水量、pH和电导率

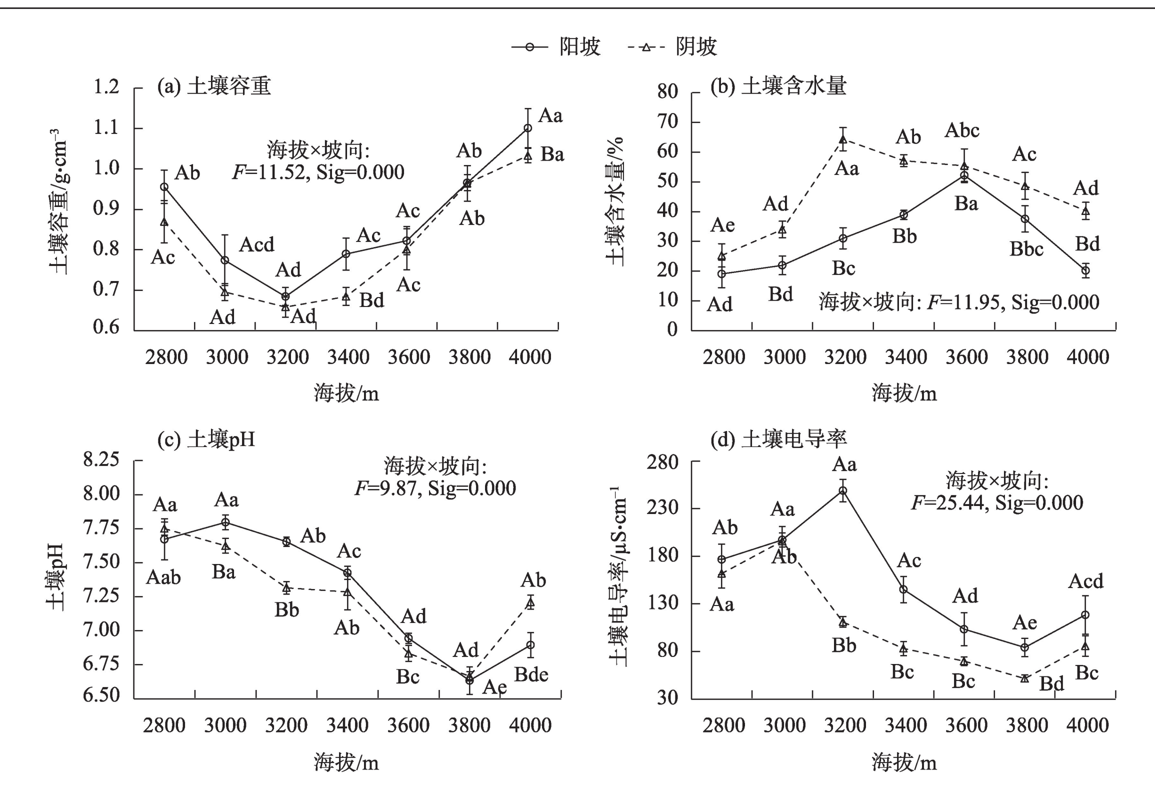
海拔和坡向的交互效应对土壤容重、含水量、pH和电导率有显著影响（$P<0.05$）（图1）。随着海拔的升高，土壤容重呈先降低后升高，阳坡和阴坡均在海拔3200 m处达最小值（0.68 g·cm^{-3}和0.66 g·cm^{-3}）（图1a）；同一海拔梯度上，阴坡土壤容重均低于阳坡。随着海拔的升高，土壤含水量呈先升高后降低，阳坡和阴坡分别在海拔3600 m（52.18%）和3200 m（64.36%）处达最大值（图1b）；同一海拔梯度上，阴坡土壤含水量均高于阳坡，除海拔3600 m外，其他海拔梯度阴坡与阳坡之间差异显著（$P<0.05$）。随着海拔的升高，阳坡土壤pH呈先升高后降低再升高，阴坡呈先降低后升高的变化趋势，阳坡的最大值和最小值分布在海拔3000 m（7.80）和3800 m（6.63）处，而阴坡在海拔3800 m处达最小值（6.67）（图1c）；同一海拔梯度上，除海拔2800 m、3800 m和4000 m外，阳坡土壤pH均高于阴坡，且海拔3000

表2　不同海拔和坡向下高寒草甸植被特征

Tab. 2　Vegetation characteristics of alpine grasslands at different altitudes and aspect

海拔/m	植被盖度/%		草层高度/cm		地上生物量/g·m^{-2}	
	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡
2800	46.67±2.89Bd	66.67±2.89Ad	7.07±0.57Bc	8.11±0.57Ac	106.67±14.10Bc	142.13±18.11Ac
3000	70.00±2.89Bb	83.33±5.00Ab	8.95±0.51Ab	9.88±0.76Ab	186.67±13.28Bb	219.47±15.56Ab
3200	80.00±5.00Ba	96.67±2.89Aa	11.19±0.48Ba	13.04±0.56Aa	214.13±21.09Ba	307.60±32.56Aa
3400	73.33±2.89Bb	80.00±2.89Abc	7.40±0.25Bc	9.70±0.49Ab	177.47±13.86Bb	200.27±14.62Ab
3600	70.00±5.00Ab	75.00±2.89Ac	5.40±0.59Bd	7.77±0.51Ac	113.74±9.23Bc	150.80±7.08Ac
3800	60.00±2.89Ac	65.00±2.89Ad	4.68±0.19Be	6.96±1.06Ac	70.14±8.52Ad	78.934±15.60Ad
4000	25.00±5.00Ae	20.00±1.15Ae	3.66±0.08Bf	4.06±0.48Ad	56.14±21.53Ad	66.00±17.21Ad
海拔×坡向	*		NS		*	

注：同列小写字母表示同一坡向不同海拔之间的差异性（$P<0.05$）；同行大写字母表示同一海拔不同坡向之间的差异性（$P<0.05$）；NS表示无显著差异；*、**分别表示在$P<0.05$、$P<0.01$水平差异显著。下同。



注：小写字母表示同一坡向不同海拔之间的差异性(P<0.05)；大写字母表示同一海拔不同坡向之间的差异性(P<0.05)。下同。

图1 不同海拔和坡向下高寒草甸土壤容重、含水量、pH和电导率

Fig. 1 Soil bulk density, water content, pH, and conductivity of alpine grasslands at different altitudes and aspect

m、3200 m、3600 m和4000 m阴坡与阳坡的土壤pH之间差异显著(P<0.05)。随着海拔的升高，除海拔4000 m外，土壤电导率在阳坡和阴坡呈先升高后降低(图1d)，阳坡和阴坡土壤电导率分别在海拔3200 m(249.00 μS·cm^{-1})和海拔3000 m(195.83 μS·cm^{-1})处达最大值；同一海拔梯度上，除海拔2800 m和3000 m外的其他海拔的阳坡土壤电导率均高于阴坡，且差异显著(P<0.05)。

2.3 不同海拔和坡向下高寒草甸土壤养分含量变化特征

海拔和坡向的交互效应对土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量有显著影响(P<0.05)(图2)。随着海拔的升高，土壤有机碳在阳坡和阴坡呈先升高后降低的变化趋势(图2a)，阳坡和阴坡土壤有机碳在海拔3200 m处达最大值(85.66 g·kg^{-1}和99.26 g·kg^{-1})；同一海拔梯度上，海拔3200 m以下阴坡土壤有机碳均高于阳坡，且海拔2800 m和3000 m阴坡与阳坡之间差异显著(P<0.05)。土壤全氮随海拔和坡向的变化规律与土壤有机碳类似(图2b)。随着海拔的升高，土壤全磷在阳坡和阴坡呈先降低后升高的变化趋势(图2c)，阳坡和阴坡土壤全磷在海拔3800 m处达最小值(0.77 g·kg^{-1}和0.54 g·kg^{-1})；同一海拔梯度上，除海拔4000 m外，其他海拔梯度阳坡土壤全磷均高于阴坡。随着海拔的升高，土壤全钾在阳坡和阴坡呈先升高后降低的变化趋势(图2c)，阳坡和阴坡土壤全钾分别在海拔3600 m(12.24 g·kg^{-1})和3800 m(14.45 g·kg^{-1})处达最大值；同一海拔梯度上，海拔3200 m、3400 m和3600 m梯度阳坡土壤全钾含量高于阴坡，其他海拔梯度阳坡土壤全钾低于阴坡。

土壤碱解氮随海拔和坡向的变化规律与土壤有机碳类似(图3a)。随着海拔的升高，土壤速效磷在阳坡和阴坡呈先升高后降低的变化趋势(图3b)，均在海拔3200 m处达最大值(24.62 mg·kg^{-1}和28.75 mg·kg^{-1})；同一海拔梯度上，阴坡土壤速效磷高于阳坡，除海拔4000 m外，其他海拔均差异不显著(P>0.05)。随着海拔的升高，土壤速效钾在阳坡和阴坡呈先升高后降低的变化趋势(图3c)，均在海拔3200 m处达最大值(286.61 mg·kg^{-1}和221.06 mg·kg^{-1})；同一海拔梯度上，除海拔3600 m和4000 m外，

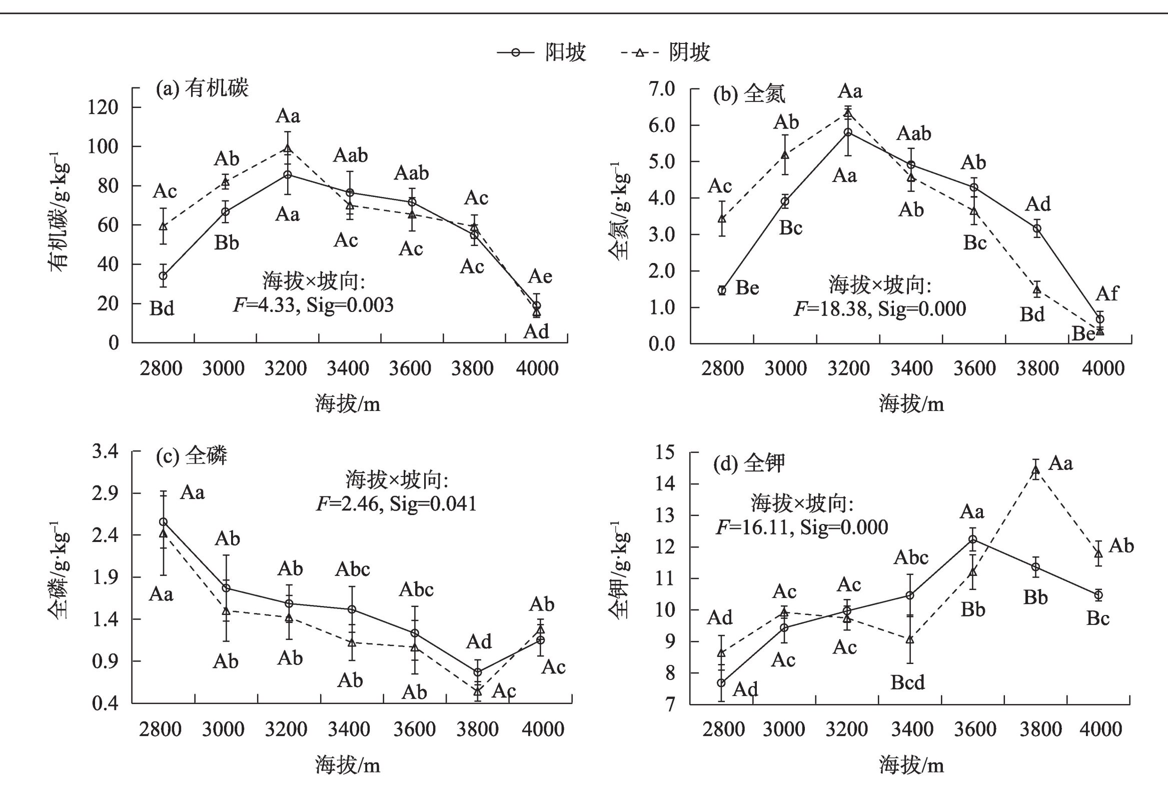


图2 不同海拔和坡向下高寒草甸土壤有机碳、全氮、全磷、全钾变化特征

Fig. 2 Changes of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and total potassium of alpine grasslands at different altitudes and aspect

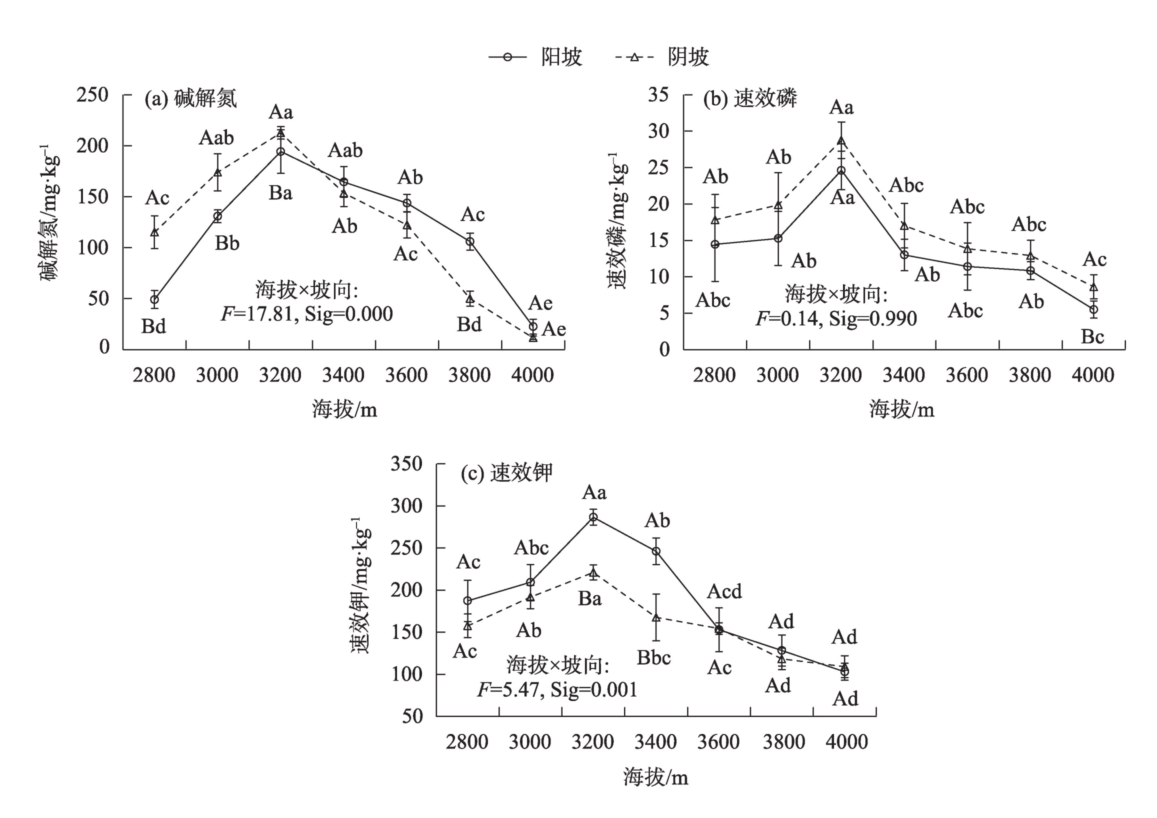


图3 不同海拔和坡向下高寒草甸土壤碱解氮、速效磷、速效钾变化特征

Fig. 3 Changes of soil alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium of alpine grasslands at different altitudes and aspect

阴坡土壤速效钾低于阳坡。

2.4 不同海拔和坡向下高寒草甸土壤化学计量比

不同海拔和坡向的高寒草甸土壤C/N处于14.55~38.13之间(图4a),随着海拔的升高,土壤C/N在阳坡和阴坡均呈先降低后升高的变化趋势,阳坡土壤C/N在海拔3200 m处达最小值(14.55),阴坡土壤C/N在海拔3400 m处达最小值(15.20);同一海拔梯度上,海拔2800 m、3000 m和3400 m阳坡的C/N高于阴坡,其他海拔阳坡的C/N低于阴坡,且海拔2800 m和4000 m的阴坡与阳坡土壤C/N差异显著(P<0.05)。不同海拔和坡向的高寒草甸土壤C/P处于12.61~87.94之间,随着海拔的升高,阳坡和阴坡土壤C/P均呈先升高后降低的变化趋势,阳坡和阴坡土壤C/P在海拔3800 m处达最大值(75.24和87.91);同一海拔梯度上,除海拔4000 m外,阳坡土壤C/P均低于阴坡(图4b)。不同海拔和坡向的高寒草甸土壤N/P处于0.58~5.01之间,土壤N/P的变化规律与C/P类似(图4c)。

2.5 土壤因子与植被特征关系及基于植被和土壤因子的聚类分析

将土壤因子与植被特征进行RDA分析发现(图5a),第一轴和第二轴的总贡献率为95.18%,具有生物学统计意义。即前两轴可以比较完全的反映出高寒草甸土壤与植被的信息,以第一轴为主。由图5a可知,高寒草甸植被特征受土壤容重、全氮和速效磷的影响较大,且土壤容重对植被特征的影响呈负相关,全氮和速效磷的影响呈正相关。

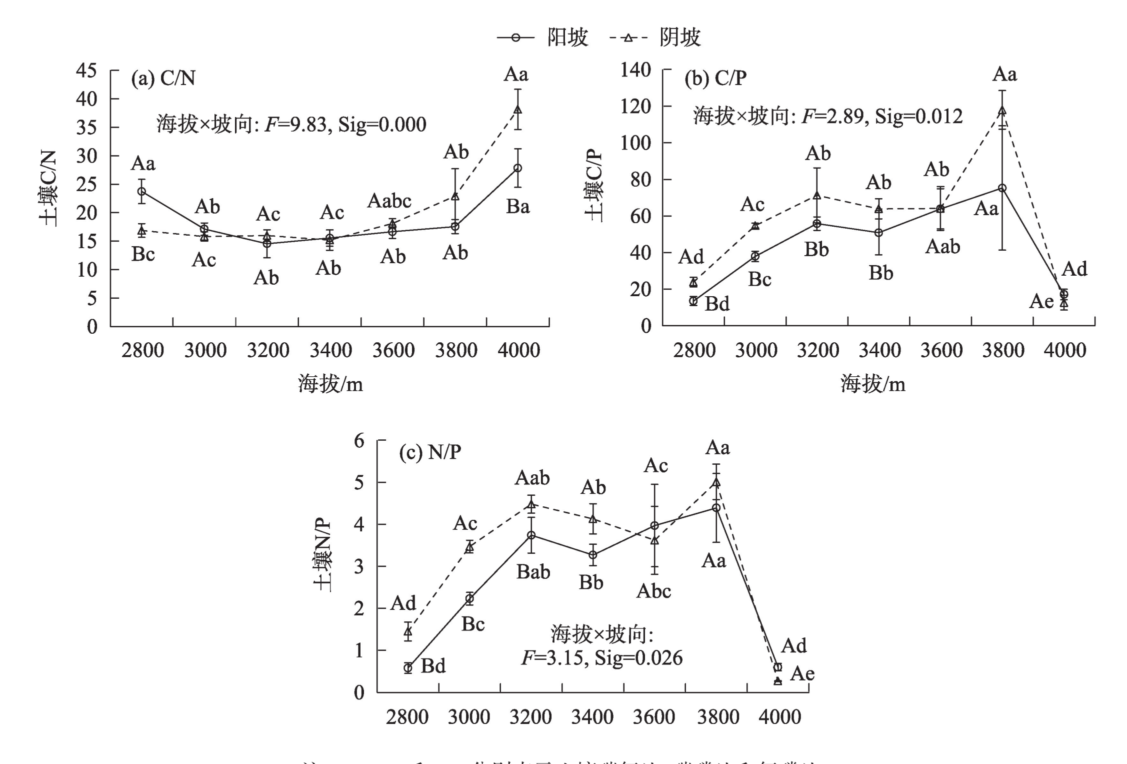
基于本文植被特征、土壤理化性质和生态化学计量比指标,对不同海拔和坡向处理进行聚类分析发现(图5b),高海拔(3600 m、3800 m和4000 m)和低海拔区域(2800 m)的坡向之间类似性高于中海拔区域(3000 m、3200 m和3400 m)。

3 讨论

土壤是植物生长发育的基础载体,是各类生态环境因子与生物群落经过长期相互作用的产物[19],而土壤理化性质不仅仅是衡量土壤肥力的重要指标[20],还是土壤质量评价的基础[19]。海拔和坡向作为重要的地形因素,能够通过改变环境因子(气温、年降水量、年积温、植被群落组成)影响着土壤理化性质[19-20]。

3.1 土壤物理性质

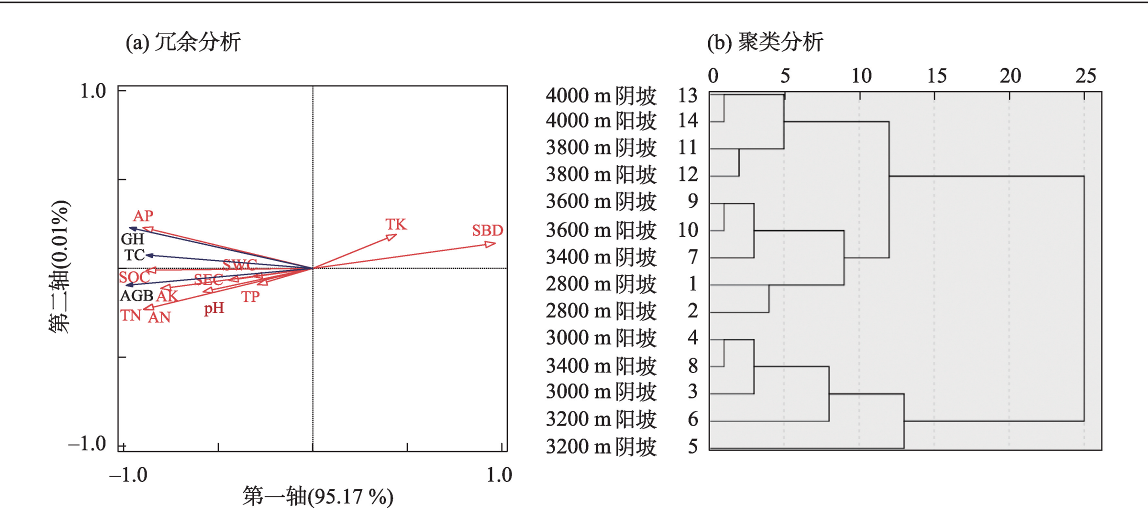
土壤容重和含水量是反映土壤物理性质的重



注:C/N、C/P和N/P分别表示土壤碳氮比、碳磷比和氮磷比。

图4 不同海拔和坡向下高寒草甸土壤化学计量比变化特征

Fig. 4 Changes of soil stoichiometric of alpine grasslands at different altitudes and aspect



注：AP为速效磷；GH为草层高度；TC为总盖度；SOC为有机碳；AGB为地上生物量；AK为速效钾；TN为全氮；AN为碱解氮；TP全磷；SWC为含水量；SEC为电导率；TK为全钾；SBD为土壤容重。

图5　土壤因子与植被特征冗余分析及基于植被和土壤因子的聚类分析

Fig. 5　Redundancy analysis of soil factors and vegetation characteristics and cluster analysis based on vegetation and soil factors

要指标；土壤pH不仅影响着土壤养分循环和酶活性[21]，而且还参与了土壤中的许多化学反应和过程[22]；土壤电导率是衡量土壤养分含量的重要参数，能够准确地反映土壤质量。刘西刚等[20]研究发现，土壤含水量随海拔升高先升高后降低，而土壤容重随海拔升高逐渐降低。吕宸等[23]研究发现，半阴坡土壤容重大于半阳坡，土壤含水量阴坡大于阳坡。冯挺等[24]研究发现，土壤含水量、电导率随着海拔的升高呈先增加后降低趋势，阴坡土壤电导率小于阳坡。本研究发现，随着海拔的升高，土壤容重和pH先降低后升高，土壤含水量和电导率先升高后降低；同一海拔，大部分海拔阳坡土壤容重、pH和电导率高于阴坡，但是阳坡土壤含水量低于阴坡，这与车明轩等[25]等研究结果类似。由于研究区高寒草草甸主要分布在2800~4000 m，在3200 m以下，随着海拔的升高，草地植被盖度增加，同时气温下降，潜在蒸发量减少，冰雪融化进一步促使土壤含水量上升，草地植被根系活性增强，土壤容重和pH降低；当海拔超过3400 m后，低气温不利于植物的生长，冰雪融化水较少，土壤含水量逐渐下降，导致植被盖度下降和植物根系活力减缓[22]。同一海拔，阳坡接收到的太阳辐射显著高于阴坡，蒸发量差异导致土壤容重、含水量、电导率和pH的坡向差异。

3.2　土壤养分

土壤有机碳是土壤肥力的直接体现，其含量与分布特征对区域土壤碳、氮、磷、钾的分布具有显著的影响[26]。土壤氮和磷是植被生长发育以及繁殖过程中最重要的养分元素[27]。金章利等[28]经过3 a定位试验发现，高寒草甸土壤碳、氮、磷均随着海拔的升高先升高后降低。本试验中，土壤有机碳、全氮、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾含量随海拔的升高呈先升高后降低，全磷呈先降低后升高；同一海拔，阳坡的土壤全磷(除海拔4000 m)和速效钾(除海拔3600 m和4000 m)高于阴坡，海拔3200 m以下阳坡的土壤有机碳、全氮、碱解氮和速效磷低于阴坡，这与金章利等[28]等研究结论存在差异，这可能是全磷分布的地域性差异造成的。随着海拔升高，气温下降，促使植物凋落物和土壤有机质增加，进一步加速了土壤微生物呼吸和微生物对土壤养分的利用效率，即一定范围内海拔的升高，提高了土壤有机碳和氮的含量[29]。海拔相同时，低海拔区域坡向对水热的二次分派明显，高海拔区域，气温过低，坡向对水热的分派减弱[30]。在高海拔，受气温较低的限制，减缓了土壤有机质的利用和矿化率，导致土壤有机碳和氮含量降低[31]。

3.3　土壤生态化学计量比

土壤生态化学计量可以反映土壤内部养分循环状况，对陆地生态系统的固碳过程具有很强的调控作用[32]，具有重要的生态指示作用[33]。由于环境因子差异，不同海拔和坡向土壤碳、氮、磷的总量变化很大，从而使土壤C/N、C/P和N/P存在较大的空

间变异性[34]。本研究发现,不同海拔和坡向的高寒草甸土壤C/N处于14.55~38.13之间,除海拔4000 m外,其他样地的C/N均低于25,即有利于碳转化;随海拔的升高,土壤C/N先降低后升高,同一海拔,海拔2800 m、3000 m和3400 m阳坡的C/N高于阴坡,其他海拔阳坡的C/N低于阴坡,这与高海宁等[14]研究结果相同,而与陈涵兮等[1]研究结果存在差异,主要的原因是陈涵兮等[1]研究区域属于低海拔区域。本研究发现,不同海拔和坡向的高寒草甸土壤C/P处于12.61~87.94之间,低于我国陆地生态系统平均值(105),也就是说研究区土壤碳、磷有效性较高。研究表明,当N/P<10时,植被生产力受氮素限制,当N/P>20时,植被生产力受磷素限制[29,35]。本研究不同海拔和坡向的高寒草甸土壤N/P处于0.27~5.01之间,随着海拔的升高,N/P先升高后降低,也就是说高寒草甸生产力主要受土壤氮限制,低海拔和高海拔区域更为严重;同一海拔,大部分海拔阳坡土壤N/P低于阴坡。

3.4 影响高寒草甸植被特征的关键土壤因子

植被和土壤是高寒草地生态系统的重要组成部分,且相互影响相互制约[36]。相关研究发现,草地植被变化引起的土壤理化性质的改变将反作用于植物本身,尤其是土壤营养元素(氮、磷、钾等)、土壤水分等对植物性状、凋落物分解等均有显著影响,从而进一步影响植被的可持续性[37]。本研究中,基于RDA分析发现,土壤容重、全氮和速效磷是影响高寒草甸植被的关键土壤因子,这与李海云[35]在祁连山高寒草甸植被与土壤互作关系的研究结果类似。聚类分析将不同海拔和坡向的高寒草甸划分为两类,其中一类为海拔3000 m的阴坡和阳坡、3200 m的阴坡和阳坡、3400 m的阴坡和阳坡,另一类为2800 m阴坡和阳坡、3600 m阴坡和阳坡、3800 m阴坡和阳坡以及4000 m阴坡和阳坡,也就是说,海拔3000 m和3400 m是该区域草地植被和土壤特征发生变化的临界线。

海拔和坡向等地形因子的变化,显著的改变了高寒草甸植被特征和土壤物理结构、养分含量和生态化学计量比,进一步形成了高寒草地山地生态系统的复杂性和异质性。因此,在高寒草地管理过程中,应该充分考虑地形因素(海拔和坡向)对草地的影响,制定合理的管理制度和措施,促进高寒草地生态系统的可持续发展。

4 结 论

基于不同海拔和坡向东祁连山高寒草甸土壤理化性质及与植被特征关系研究结果表明:

(1) 东祁连山高寒草甸土壤含水量、电导率、有机碳、全氮、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾含量、C/P和N/P随海拔的升高呈先升高后降低的变化趋势,土壤容重、全磷和C/N呈先降低后升高的变化趋势。

(2) 同一海拔,大部分海拔梯度阳坡的土壤土壤容重、速效钾、电导率和全磷高于阴坡,阳坡的土壤含水量、速效磷、C/P和N/P低于阴坡,海拔3200 m梯度以下阳坡的土壤有机碳、全氮、碱解氮和C/N低于阴坡。

(3) 基于对N/P比的研究发现,高寒草甸类草原的初级生产力主要受土壤氮限制,且低海拔和高海拔区域尤显突出。

(4) 结合RDA和聚类分析发现,土壤容重、全氮和速效磷是影响高寒草甸植被生长的关键土壤因子,且海拔3000 m和3400 m是该区域草地植被和土壤特征发生变化的临界线。建议在高寒草甸类草原的管理过程中,应充分考虑海拔和坡向的分异性特征。

参考文献(References)

[1] 陈涵兮, 海龙, 黄利民, 等. 坡向对毛竹林土壤养分及其生态化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 2915−2922. [Chen Hanxi, Hai Long, Huang Limin, et al. Effects of slope direction on soil nutrient and its ecological stoichiometry in bamboo forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(9): 2915−2922.]

[2] 董廷发. 不同海拔云南松林土壤养分及其生态化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 672−679. [Dong Tingfa. Soil nutrients and their ecological stoichiometry of *Pinus yunnanensis* forest along an elevation gradient[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(3): 672−679.]

[3] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2−6. [He Jinsheng, Han Xingguo. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 2−6.]

[4] Zhang J, Ning Z, Liu C, et al. C:N:P stoichiometry in China's forests: From organs to ecosystems[J]. Functional Ecology, 2017, 32(1): 50−60.

[5] 陈云, 李玉强, 王旭洋, 等. 中国典型生态脆弱区生态化学计量

学研究进展[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4213–4225. [Chen Yun, Li Yuqiang, Wang Xuyang, et al. Advances in ecological stoichiometry in typically and ecologically vulnerable regions of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4213–4225.]

[6] 孙小妹, 何明珠, 周彬, 等. 霸王根茎叶非结构性碳与C:N:P计量特征对干旱的响应[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 240–249. [Sun Xiaomei, He Mingzhu, Zhou Bin, et al. Non-structural carbohydrates and C:N:P stoichiometry of roots, stems, and leaves of *Zygophyllum xanthoxylon* in responses to xeric condition[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 240–249.]

[7] 李慧, 高志强, 薛建福. 夏闲期耕作对旱地麦田土壤物理质量的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(2): 15–21. [Li Hui, Gao Zhiqiang, Xue Jianfu. Effects of tillage during summer fallow on soil physical properties of dryland winter wheat fields in the Loess Plateau[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2018, 38(2): 15–21.]

[8] 王宝荣, 杨佳佳, 安韶山, 等. 黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 247–259. [Wang Baorong, Yang Jiajia, An Shaoshan, et al. Effects of vegetation and topography features on ecological stoichiometry of soil and soil microbial biomass in the hilly-gully region of the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 247–259.]

[9] 王根绪, 程国栋. 江河源区的草地资源特征与草地生态变化[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 101–107. [Wang Genxu, Cheng Guodong. Characteristics of grassland and ecological changes of vegetations in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(2): 101–107.]

[10] 李强, 柳小妮, 张德罡, 等. 祁连山自然保护区不同草地类型地上生物量和土壤微量元素特征分析[J]. 草原与草坪, 2021, 41(3): 48–56. [Li Qiang, Liu Xiaoni, Zhang Degang, et al. Characteristics of aboveground biomass and soil trace elements of different grassland types in Qilian Mountain Reserve[J]. Grassland and Turf, 2021, 41(3): 48–56.]

[11] Li Q, Yang J Y, Liu X N, et al. Soil fertility evaluation and spatial distribution of grasslands in Qilian Mountains Nature Reserve of eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. PeerJ, 2021, 9: e10986, doi: 10.7717/peerj.10986.

[12] Fang Y P, Zhao C, Ding Y J, et al. Impacts of snow disaster on meat production and adaptation: An empirical analysis in the Yellow River source region[J]. Sustainability Science, 2016, 11(2): 249–260.

[13] 马剑, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山5种典型灌丛土壤生态化学计量特征[J]. 西北植物学报, 2021, 41(8): 1391–1400. [Ma Jian, Liu Xiande, Jin Ming, et al. Soil ecological stoichiometry of five typical shrubs in Qilian Mountain[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(8): 1391–1400.]

[14] 高海宁, 李彩霞, 孙小妹, 等. 祁连山北麓不同海拔土壤化学计量特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(1): 219–227. [Gao Haining, Li Caixia, Sun Xiaomei, et al. Stoichiometry characteristics of soil at different altitudes in the Qilian Mountains[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(1): 219–227.]

[15] 张小芳, 刘贤德, 敬文茂, 等. 祁连山不同海拔火绒草叶片生态化学计量特征及其与土壤养分的关系[J]. 应用生态学报, 2019, 30(12): 4012–4020. [Zhang Xiaofang, Liu Xiande, Jing Wenmao, et al. Characteristics of *Leontopodium leontopodioides* leaf stoichiometry with altitude and their relationship with soil nutrients in Qilian Mountains, northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(12): 4012–4020.]

[16] Liu J G, Gou X H, Zhang F, et al. Spatial patterns in the C:N:P stoichiometry in Qinghai spruce and the soil across the Qilian Mountains, China[J]. Carena, 2021, 196: 104814, doi: 10.1016/j.catena.2020.104814.

[17] 中国科学院南京土壤研究所物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1987. [Laboratory of Physics, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Determination of soil physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1987.]

[18] 张德罡, 马玉秀. 草原土壤速效磷测定方法的比较[J]. 草业科学, 1995, 12(3): 70–72. [Zhang Degang, Ma Yuxiu. The comparison of the method for measuring available phosphorus in grassland soil[J]. Prtacultural Science, 1995, 12(3): 70–72.]

[19] 马剑, 刘贤德, 李广, 等. 祁连山北麓中段青海云杉林土壤水热时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 1033–1040. [Ma Jian, Liu Xiande, Li Guang, et al. Spatial and temporal variations of soil moisture and temperature of *Picea Crassifolia* forest in north piedmont of central Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 1033–1040.]

[20] 刘西刚, 王勇辉, 焦黎, 等. 夏尔希里自然保护区草地表层土壤理化性质与海拔高度的关系[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6): 773–780. [Liu Xigang, Wang Yonghui, Jiao Li, et al. Study on the relationship between physical and chemical properties of grassland surface soil and altitude in Xarxili Nature Reserve[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(6): 773–780.]

[21] Simard R R, Lapierre C, Tran T S. Effects of tillage, lime, and phosphorus on soil pH and mehlich-3 extractable nutrients[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 1994, 25(9–10): 1801–1815.

[22] Masto R E, Ansari M A, George J, et al. Co-application of biochar and lignite fly ash on soil nutrients and biological parameters at different crop growth stages of *Zea mays*[J]. Ecological Engineering, 2013, 58: 314–322.

[23] 吕宸, 龚伟, 车明轩, 等. 海拔和坡向对高寒灌丛草甸凋落物水源涵养功能的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 219–225, 243. [Lü Huan, Gong Wei, Che Mingxuan, et al. Effects of altitude and slope direction on water conservation function of litter in alpine shrub meadow[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 219–225, 243.]

[24] 冯挺, 黄法融, 郝建盛, 等. 巩乃斯河谷地带地表土壤水分和电

导率的分布特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1457-1468. [Feng Ting, Huang Farong, Hao Jiansheng, et al. Spatial distribution of surface soil moisture and soil conductivity in the Kunes Valley[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6): 1457-1468.]

[25] 车明轩, 吴强, 方浩, 等. 海拔、坡向对川西高山灌丛草甸土壤氮、磷分布的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(5): 1163-1169. [Che Mingxuan, Wu Qiang, Fang Hao, et al. Effects of altitude and slope on the distribution of nitrogen and phosphorus in alpine shrub meadow soil in western Sichuan[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, 27(5): 1163-1169.]

[26] Sollins P, Gregg J W. Soil organic matter accumulation in relation to changing soil volume, mass, and structure: Concepts and calculations[J]. Geoderma, 2017, 301: 60-71.

[27] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions[J]. Ecological Applications, 2010, 20(1): 5-15.

[28] 金章利, 刘高鹏, 周明涛, 等. 喀斯特山地草地群落多样性海拔特征及土壤理化性质特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(4): 661-668. [Jin Zhangli, Liu Gaopeng, Zhou Mingtao, et al. Elevation characteristics of grassland community diversity and effect of soil physical and chemical properties in Karst mountain grassland[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(4): 661-668.]

[29] Zhang W, Gao D X, Chen Z X, et al. Substrate quality and soil environmental conditions predict litter decomposition and drive soil nutrient dynamics following afforestation on the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2018, 325: 152-161.

[30] 刘旻霞, 王刚. 高寒草甸植物群落多样性及土壤因子对坡向的响应[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 259-265. [Liu Minxia, Wang Gang. Responses of plant community diversity and soil factors to slope aspect in alpine meadow[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(2): 259-265.]

[31] 姜哲浩, 周泽, 张德罡, 等. 三江源区不同海拔高寒草原土壤养分及化学计量特征[J]. 草地学报, 2019, 27(4): 1029-1036. [Jiang Zhehao, Zhou Ze, Zhang Degang, et al. Soil nutrient and stoichiometry of alpine steppe under different altitudes in the Three-River Headwaters Region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(4): 1029-1036.]

[32] 张海东, 汝海丽, 焦峰, 等. 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征[J]. 环境科学, 2016, 37(3): 1128-1138. [Zhang Haidong, Ru Haili, Jiao Feng, et al. C, N, P, K stoichiometric characteristic of leaves, root and soil in different abandoned years in Loess Plateau[J]. Environmental Science 2016, 37(3): 1128-1138.]

[33] Fan H, Wu J, Liu W, et al. Linkages of plant and soil C:N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations[J]. Plant and Soil, 2016, 392(1-2): 127-138.

[34] Bing H J, Wu Y H, Zhou J, et al. Stoichiometric variation of carbon, nitrogen, and phosphorus in soils and its implication for nutrient limitation in alpine ecosystem of eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Soils & Sediments, 2016, 16(2): 405-416.

[35] 李海云. 祁连山高寒草地退化过程中"植被-土壤-微生物"互作关系[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019. [Li Haiyun. Interaction of "vegetation-soil-microbe" in the process of alpine grassland degradation in Qilian Mountains[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019.]

[36] 王军, 张骁, 高岩. 青藏高原植被动态与环境因子相互关系的研究现状与展望[J]. 地学前缘, 2021, 28(4): 70-82. [Wang Jun, Zhang Xiao, Gao Yan. The relationships between vegetation dynamics and environmental factors on the Qinghai-Tibet Plateau: A review of research progress and prospect[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(4): 70-82.]

[37] Han X, Hu Z, Xin G, et al. Studies on the characteristics of vegetation and soil on mount Sejila, Tibet[J]. Pakistan Journal of Botany, 2014, 46(2): 457-464.

Response of soil physical and chemical properties to altitude and aspect of alpine meadow in the eastern Qilian Mountains and their relationships with vegetation characteristics

LI Qiang[1], HE Guoxing[1], WEN Tong[1], YANG Dongyang[1], ZHANG Degang[1], HAN Tianhu[2], PAN Dongrong[2], LIU Xiaoni[1]

(1. College of Grassland Science/Key Laboratory of Grassland Ecosystem of the Ministry of Education, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Grassland Technology Extension Station of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: To investigate the response of physical and chemical properties of alpine meadow soil to altitude and their interconnection to vegetation characteristics, the alpine meadows in the eastern Qilian Mountain of China were chosen as the research object. The changes to seven altitudes and two soil nutrient content and ecological stoichiometric aspects in the alpine meadows and their interconnection with the vegetation were analyzed. The results demonstrated that (1) soil water content, electrical conductivity, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total potassium (TK), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) were affected. carbon-phosphorus ratio (C/P) and nitrogen-phosphorus ratio (N/P) appeared to increase first and then decreased with the increase in altitude. The soil bulk density, total phosphorus (TP), and carbon-nitrogen (C/N) decreased first and then increased. (2) At the same altitude, soil bulk density, AK, electrical conductivity, and TP were higher in the sunny aspect than in the shady aspect; soil moisture content, AP, C/P, and N/P were lower in the sunny aspect than in the shady aspect, and SOC, TN, AN, and C/N were lower in the sunny aspect under 3200 m than in the shady aspect. (3) The C/N, C/P, and N/P of the alpine meadow soils at different altitudes and aspects were between 14.55−38.13, 12.61−87.94, and 0.27−5.01. (4) Redundancy analysis revealed that soil bulk density, TN, and AP are the most important soil factors influencing the vegetation of alpine meadows. Cluster analysis discovered that the shady and sunny aspects at an altitude of 3200−3400 m were clustered together. Finally, the physical and chemical properties of the soil and ecological stoichiometry of the alpine meadows in the eastern Qilian Mountains changed regularly with altitude and aspect differentiation. Based on the N/P rate, soil nitrogen was the main constraint to alpine meadow productivity, which was severe in low and high-altitude areas. Based on cluster analysis, 3000 m and 3400 m were identified as the critical lines for change in vegetation and soil characteristics in this area, suggesting that altitude and aspect differentiation should be considered in alpine meadow management.

Key words: alpine meadow; altitude; aspect; ecological stoichiometry; redundancy analysis (RDA)